

# **PREÂMBULO**

## **OBJECTIVOS E ESTRUTURA DO TRABALHO**

---

### **i - Introdução**

A activação alcalina de alumino-silicatos vem promover o reencontro com técnicas muito provavelmente já usadas anteriormente pelo Homem e que, a despeito de terem ficado perdidas nos labirintos da História, deixaram marcas e realizações notáveis que hoje se admiram e que inculcam, ao estudá-las mais em pormenor, alguma perplexidade.

Em concreto, são conhecidas obras da Antiguidade Clássica, como por exemplo o Coliseu de Roma, o Panteão Romano ou as Termas de Caracala, onde foram utilizados materiais pétreos artificialmente aglomerados (betões e argamassas) que patenteiam um comportamento notável, não só mecânico como, muito principalmente, em termos da durabilidade e da resistência às acções de meteorização.

A (re)descoberta destes materiais com propriedades cimentíceas pode implicar uma mais valia assinalável, pois tudo indica que as conhecidas limitações do cimento Portland parecem ser em grande parte ultrapassadas com estes ligantes que se assemelham na sua síntese aos materiais naturais que constituem uma fatia importante das rochas da crosta terrestre.

Tais limitações manifestam-se não só quanto aos problemas de carácter ambiental com peso considerável em termos da poluição por CO<sub>2</sub>, como também do ponto de vista do seu comportamento mecânico e desempenho face às agressões do

meio. Importa também referir a necessidade de utilização nos betões, de que esse cimento é o principal aglutinante, de agregados pétreos com adequada calibração granulométrica, cuja disponibilidade começa já a ser problemática em muitas zonas do nosso País, como é o caso das areias roladas de origem natural, ou que provocam estragos dificilmente remediáveis na paisagem, como por exemplo a abertura de pedreiras e as obras de desmonte.

Parece, portanto, evidente o interesse de promover o desenvolvimento de sistemas ligantes alternativos que, cumprindo os mesmos objectivos de desempenho, permitam o alívio da pressão sobre o Ambiente e possam integrar uma gama de materiais constituintes mais vasta e menos exigente.

Segundo alguns autores, vai ter de verificar-se até ao ano 2015, não só devido a questões de ordem ambiental mas também de poupança energética, uma alteração radical na produção de cimento Portland, limitando a 1000 milhões de toneladas a produção anual de clínquer a nível mundial, o reforço da utilização de adições (do tipo cinzas volantes, escórias, cinzas de casca de arroz, etc.), que se prevê possam representar até 850 milhões de toneladas anuais e que os restantes 1650 milhões de toneladas que venham a ser necessários nessa data para satisfazer a procura estimada em 3500 milhões de toneladas, sejam obtidos à custa de metacaulino activado por álcalis [1].

Vê-se por aqui o enorme potencial que parece desenhar-se no horizonte para os materiais obtidos por activação alcalina, que permitem a incorporação de um leque muito mais vasto de agregados no fabrico de betões e argamassas, com particular relevo para os resíduos sólidos não orgânicos de grande parte das indústrias e de um número importante de processos de queima e incineração, bem como restos de pedreiras, de demolições ou de escombros de mineração.

Segundo a generalidade das referências bibliográficas, os materiais obtidos por activação alcalina (ou geopolimerização, como também pode dizer-se) são em geral mais resistentes do ponto de vista mecânico, apresentam maior durabilidade e estabilidade e atingem estes graus de comportamento muito mais rapidamente que os materiais fabricados com a utilização do cimento Portland [2].

Por outro lado, os investigadores são unânimes em referir que as propriedades do produto final dependem essencialmente das características dos materiais de partida, e por isso se coloca tão prementemente a questão de saber até que ponto são ou não interessantes os alumino-silicatos de que se dispõe em Portugal com vista à obtenção de sistemas geopoliméricos e qual é a valia e ou capacidades que esses sistemas geopoliméricos podem apresentar.

A ênfase específica que neste trabalho se coloca na aptidão dos caulinos disponíveis no nosso País para a activação alcalina não é circunstancial. Se, de facto, não é um dado adquirido que se obtenham sempre bons resultados com qualquer tipo de caulino, a avaliação da aptidão de outros alumino-silicatos, em particular os que se obtêm como resíduos de algumas indústrias nacionais, como as cinzas volantes e de incineração, as escórias granuladas de alto forno e restos de materiais cerâmicos, de demolição e de mineração, entre outros, fica sempre condicionada pela relativa disponibilidade desses materiais, já parcialmente destinados a outros processos de transformação/incorporação ou pela variabilidade da sua composição química de partida. Por estas razões os caulinos, embora possam apresentar de local para local também variações de composição química, estão disponíveis em quantidades confortáveis para se poder encarar com segurança a sua eventual utilização.

Podem ser também activados, em determinadas condições, outros tipos de alumino-silicatos como a ilite, a almandina, a augite, a heulandite, a anortite, e ainda outros [3]. Dado que se trata de materiais com uma abundância limitada ou mesmo

muito limitada em Portugal, a sua referência aqui é meramente académica e visa pôr em destaque o amplo espectro da activação alcalina, não se revestindo o seu estudo, ao menos para já, de particular importância.

A (re)descoberta de propriedades aglutinantes em materiais cuja disponibilidade é muito vasta (os alumino-silicatos representam mais de 75% dos componentes sólidos da crosta terrestre) e cujo processamento parece implicar apreciáveis vantagens em termos do comportamento e desempenho globais, com importantes ganhos no domínio ambiental e sem agravamento significativo de custos, representa um alargamento racional e muito importante do tipo de materiais que se poderão usar nas mais diversas realizações correntes, com destaque para aquelas que estão mais sujeitas a maior degradação químico-física. Por outro lado, poderá permitir uma exploração mais equilibrada e racional dos recursos disponíveis, promovendo também a reintegração segura de resíduos problemáticos, que representam actualmente uma considerável fonte de problemas.

## **ii - Objectivos**

O objectivo principal deste trabalho centra-se no estudo da aptidão potencial dos caulinos para a activação alcalina, tal como se encontram comercialmente disponíveis, envolvendo a pesquisa de várias condições complementares:

- obtenção e processamento das matérias primas precursoras;
- desenvolvimento do tipo de activadores alcalinos mais indicados para promover a activação alcalina dos caulinos seleccionados;
- estudo das condições específicas de fabrico, compactação e cura dessas argamassas e betões geopoliméricos;
- estudo das condições de utilização dos ligantes geopoliméricos em argamassas e betões;

- avaliação das possibilidades e vantagens da incorporação de certos resíduos problemáticos ou produtos industriais de fácil mobilização;
- adequação das tecnologias de fabrico e ensaio existentes, desenvolvidas para os cimentos hidráulicos do tipo Portland, a estes novos materiais;
- análise das propriedades mecânicas, químicas e de durabilidade de argamassas e betões geopoliméricos;
- comparação global com produtos equivalentes fabricados com Cimento Portland normal (CPN), como forma de situar os níveis de comportamento alcançados pelos geopolímeros;
- estudo de possíveis novas aplicações e a verificação da sua exequibilidade.

Deve notar-se que existe uma ampla diversidade dos materiais que são considerados precursores geopoliméricos, que são ainda pouco conhecidas e mal identificadas as reacções que presidem à geopolimerização e finalmente que é muito variada a gama de produtos que é possível obter com a alteração das razões molares  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  que caracterizam os alumino-silicatos.

Fica a convicção que o desbravar do caminho que por esta via se abre num domínio de investigação tão atraente como promissor, é já uma tarefa considerável em si mesma e constituiu de certo modo um desafio a que se procurou dar respostas concretas e de alcance prático.

### **iii. Metodologia**

Para concretizar o objectivo global de avaliar a aptidão de alguns caulinos portugueses numa área nova e praticamente desconhecida, tendo em vista também o aprofundamento dos conhecimentos específicos neste campo e em especial a compreensão da forma como as propriedades dos materiais de partida influenciam o

comportamento e desempenho dos ligantes que mais interessam ao domínio da Indústria da Construção, orientou-se o trabalho de acordo com o esquema seguinte:

- Selecção de caulinos comerciais, de fácil obtenção, abundantes e de origens e composições diferentes.
- Caracterização, com a necessária profundidade, das matérias primas escolhidas, quer do ponto de vista químico como físico.
- Análise da influência dos principais factores que envolvem a obtenção do metacaulino, determinando os valores mínimos da temperatura e do tempo de desidroxilação necessários para garantir com segurança as alterações estruturais indispensáveis para potenciar a activação alcalina.
- Obter o conhecimento mais rigoroso possível de todas as mudanças experimentadas pelos materiais, procurando identificar claramente os vectores que podem determinar este ou aquele comportamento do produto final.
- Identificar a influência do agente activador, analisando o desempenho de diferentes formulações dos activadores alcalinos mais correntemente utilizados.
- Caracterização do produto final em termos do seu comportamento mecânico, químico e de durabilidade.

O presente trabalho tem essencialmente em vista o domínio da Engenharia Civil e das suas aplicações. O tipo de investigação que se apresenta em escopo, tem de se apoiar necessariamente na tecnologia e meios existentes, desenvolvidos para avaliar um conjunto de propriedades e características que estão quase sempre associadas ao CPN e que, ao longo do tempo, foram reconhecidas como essenciais ao controlo das condições de utilização das argamassas e betões fabricados com aquele ligante hidráulico. Em termos concretos isto diz respeito à mistura, compactação, cura e técnicas de ensaio a que se recorre para avaliar o desempenho dos betões e argamassas feitos com CPN.

Prevê-se que, face às características específicas destes materiais, nem sempre as técnicas e procedimentos disponíveis para o estudo, observação e ensaio dos produtos feitos à base de CPN sejam adequados e produzam resultados fiáveis e significativos quando aplicados aos geopolímeros. Em certas situações poderá ser necessário propor novos processos e métodos de análise, bem como desenvolver equipamentos mais especificamente ligados às características destes materiais.

O desenvolvimento e estudo de novas técnicas, dispositivos mecânicos e equipamentos apenas serão objecto de atenção e estudo quando seja necessário para o desenrolar do projecto de investigação em curso, tendo em mente a obtenção de resultados fiáveis e repetíveis em quaisquer condições.

Pareceu importante situar os resultados obtidos com os materiais geopoliméricos em relação aos valores correntes conseguidos com o CPN, não só para apreciação global das suas potencialidades, mas também para que se justifique uma intervenção mais específica no domínio tecnológico que permita ultrapassar certas dificuldades que se possam encontrar.

As normas, procedimentos, e outros tipos de especificações usuais que ao longo deste trabalho forem sendo seguidas, serão referidas em cada caso, sendo assinalados também os procedimentos e adaptações que possam vir a fazer-se.

#### **iv. Estrutura do Trabalho**

Esta tese está dividida em nove Capítulos, designadamente:

**Capítulo 1 - Introdução** - onde se faz uma apresentação do estado actual dos conhecimentos, situando os desenvolvimentos alcançados na perspectiva de

valorização das propriedades e aplicações dos geopolímeros, referindo as dificuldades existentes quanto ao domínio dos mecanismos que comandam os processos reactivos e as limitações que resultam de não ser possível estabelecer uma metodologia única para o manuseamento de materiais com tão ampla base de partida.

**Capítulo 2 - Materiais de Partida e Procedimentos** - onde se faz referência aos materiais utilizados neste trabalho, à sua caracterização química e estrutural, quando necessária, às composições de argamassas e betões utilizadas no trabalho, bem como aos procedimentos de ensaio que se seguiram para caracterizar o comportamento dos produtos obtidos.

**Capítulo 3 - Técnicas Experimentais de Análise Usadas** - é o capítulo onde são abordadas as técnicas usadas ao longo deste trabalho para caracterizar, acompanhar e reconhecer as alterações que se verificam ao longo do processo de activação alcalina e que permitem identificar fases críticas da reacção de geopolimerização.

**Capítulo 4 - Obtenção e Caracterização do Metacaulino** - onde se descrevem as condições de obtenção do metacaulino, sua análise química e física e se estudam os valores óptimos de exposição e temperatura por forma a otimizar os resultados finais.

**Capítulo 5 - Fabrico, Compactação e Cura dos Geopolímeros** - onde se apresentam as condições de obtenção dos activadores compostos, de fabrico e de manipulação dos geopolímeros, se apresentam os resultados da caracterização química e micro-estrutural dos produtos finais, bem como se referem as propriedades reológicas e mecânicas que estão normalmente associadas ao processo de endurecimento.

**Capítulo 6 - Comportamento Mecânico** - neste capítulo são apresentados os resultados referentes às resistências mecânicas que estes novos ligantes permitem conferir aos betões e argamassas em que são incorporados. É feita a distinção entre resistências de curto prazo e de longo prazo e apresentada uma análise estatística onde se esboçam os intervalos de variação das propriedades mecânicas e se procuram identificar as tendências de evolução.

**Capítulo 7 - Avaliação da Durabilidade** - onde são apresentados os resultados dos ensaios de durabilidade realizados sobre provetes de materiais geopoliméricos, com vista a avaliar de que forma eles se comportam face às agressões a poderão estar naturalmente sujeitos, bem como se estabelece uma análise paralela com os resultados obtidos com betões de CPN de formulação equivalente.

**Capítulo 8 - Discussão** - onde se discutem os resultados obtidos por forma a estribar uma base sólida para a formulação das conclusões que é possível retirar do trabalho realizado.

**Capítulo 9 - Conclusões** - em que se apontam as principais conclusões e se perspectivam os domínios de aplicação mais aconselháveis para a utilização prática destes materiais.

